

機関番号：17102  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2010  
 課題番号：19580192  
 研究課題名（和文） 木材乾燥中の4次元的な細胞形態変化の可視化による  
 割れ発生メカニズムの解明  
 研究課題名（英文） In situ visualization with time of wood microcrack occurring during  
 drying  
 研究代表者  
 松村 順司（MATSUMURA JUNJI）  
 九州大学・大学院農学研究院・准教授  
 研究者番号：70243946

## 研究成果の概要（和文）：

その場観察システム（環境制御室内に共焦点レーザー顕微鏡を設置した経時観察システム）の構築により、木材乾燥中に発生するマイクロクラックの一部始終を経時的にその場観察することに成功した。材の組織構造が異なる針葉樹スギ、広葉樹散孔材のアカシアハイブリッド、広葉樹環孔材のセンダンを対象に、詳細なマイクロクラックの発生挙動を含水率と関係づけて検討した結果、材の組織構造がマイクロクラックの形態変化に大きく関与することが明らかになった。

## 研究成果の概要（英文）：

The microcracks occurring during drying of wood were visualized in situ under confocal laser scanning microscopy (CLSM). Precise control of relative humidity and temperature in a specialized environment chamber made it possible to acquire sequential images of the woods of *Cryptomeria japonica*, Acacia hybrid (*A. mangium* × *A. auriculiformis*) and *Melia azedarach* during drying from the green condition. Our technique made it possible to discuss the relationship between moisture content and microcrack formation during drying and clarified relationship of wood structures to microcrack characteristics. We found the CLSM technique to be an effective method for visualizing microcrack propagation with time.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：木質科学

科研費の分科・細目：林学・林産科学・木質工学

キーワード：

## 1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素を吸収する森林の地球温暖化防止に果たす役割が注目されているが、日本では国産材の利用が進まず、利用されないことが森林の荒廃を招き、炭素固定能を低下さ

せる傾向にある。主要な国産材であるスギの需要低迷の一因として乾燥問題が挙げられる。これは、心材の生材含水率の変動が大きく乾燥コストがかかることに加えて、乾燥過程で木材が収縮することによって生じる割

れや変形などの欠点が材の品質を低下させることに起因する。このようなことから多くの研究者が欠点低減に向けた乾燥スケジュール設定に取り組んでいる。また、国外に目を向けると早生樹資源の利用が年々増えているが、早生樹では成長応力に起因した乾燥に伴う割れなどの欠点が材の品質を低下させるため、欠点低減に向けた乾燥スケジュールが検討されている。これら既存の研究では、乾燥に伴う木材のマクロな変化を水分傾斜による応力の発生と関連づけて検討し、結果として割れ抑制スケジュールを提案している。しかし、「実際に変形する細胞や細胞配列が割れの大小に与える影響は?」という本質的な問いには答えていない。一方、新しい顕微鏡技術の発達は上記のような物理挙動を正確に捉えるツールとして重要度が増している。

本研究では、試料の水分状態に左右されずに3次元的な細胞形状の変化を観察できる共焦点レーザー顕微鏡の利点に着目し、試料付近の環境制御ができれば、3次元画像に時間軸を加えた4次元的な割れ発生挙動を精密に可視化できるのでは?と考え、既存の研究とは異なるアプローチで割れ発生メカニズムの解明を試みる。

## 2. 研究の目的

木材を乾燥する際に生じる割れの発生挙動をアーティファクトの影響なく、細胞レベルで経時的に可視化する方法の開発は、今後ますます高品質な乾燥材が求められる中で極めて重要である。本研究では、試料の含水状態に左右されずに観察可能な共焦点レーザー顕微鏡の利点に着目し、木材ブロック試料を設置する雰囲気の環境制御法を確立することで、乾燥に伴う割れの発生挙動を3次元的な細胞レベルの変化に時間軸を加えて4次元的に可視化する方法の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 試料:

スギ *Cryptomeria japonica*), アカシアハイブリッド (*A. mangium* × *A. auriculiformis*), センダン (*Melia azedarach*)

### (2) その場観察システム:

環境制御装置内に重量計と共焦点レーザー顕微鏡を設置し、精密湿度供給装置により温湿度を制御した。必要に応じてファンや保温電球を使用した。

定期的に画像を取得し、アニメーションを作成した。

定期的に試料の重量および観察面の電気抵抗率を測定し、試料全体の含水率および観察面の含水率を算出した。

実験は、生材状態から重量が安定するまで(含水率5%程度)行った。

## 4. 研究成果

### (1) 針葉樹材の乾燥に伴う割れ発生挙動の可視化

広葉樹に比べて組織構造が単純な針葉樹(スギ)を対象に、CLSM下において割れを発生させるための環境制御法を検討し、その場観察システムを確立した。これにより、アーティファクトの影響なく、割れ発生挙動を細胞レベルで、かつ経時的に可視化することが可能になった。この手法を使って次のことが明らかになった。まず、放射組織に沿って割れが進行する場合、割れは晩材部で発生することが明らかになった。次に、発生した割れは髄側、樹皮側の両方向へ進行するが、早材部で止まることを明らかにした。割れの進行とともに割れ幅は増大するが、乾燥終了前に減少し、発生した割れのうち、肉眼では観察できないレベルの割れが存在することが明らかになった。以上の割れ発生挙動については経時的な動画としてビジュアル化した。また、割れの深さ方向を解析したところ、晩材部で最も深く、年輪界を超える場合は急激に浅くなり、髄側への進行の場合は徐々に浅くなる傾向を明らかにした。

### (2) 広葉樹材の乾燥に伴う割れ発生挙動の可視化

広葉樹の環孔材センダンと散孔材アカシアハイブリッドを対象に、その場観察システム下で生材状態から表面と内部に水分傾斜を生じさせ、割れを発生させる環境制御法を確立し、乾燥初期に発生するマイクロクラックの経時的な挙動を可視化した。その結果、明瞭な成長輪界を有するセンダンでは、晩材部の放射組織および隣接部位で数カ所のマイクロクラックが発生し、髄側・樹皮側へ、ともに放射組織に沿って進行した後、その幅が最大になって停止した。その後、緩やかに閉じ、乾燥末期にはその存在をCLSMでは観察できない傾向が認められた。一方、明瞭な成長輪界を有しないアカシアハイブリッドでは、無数のマイクロクラックが放射組織に隣接した部位で発生し、髄側・樹皮側へ進行した後、その幅が最大になって停止した。その後緩やかに閉じるが、完全には閉じない傾向が明らかになった。以上のマイクロクラック発生挙動については経時的な動画としてビジュアル化した。

### (3) マイクロクラックの形態変化と抵抗率との関係

高抵抗率計を導入したその場観察システムを使って、スギの辺材を対象に、観察面における抵抗率の経時変化と関連づけたマイクロクラックの経時的な形態変化を可視化した。その結果、乾燥開始後、試料の平均含水率は急激に低下するが、試料表面の抵抗率は変化せず、その後ある時点で抵抗率が上昇し、

マイクロクラックが発生することが明らかになった。一方、心材では初期含水率、抽出成分がマイクロクラックの発生時期に大きく関与することが明らかになった。これら一連のマイクロクラック発生挙動について、経時的な動画としてビジュアル化した。

(4) スギにおける心材成分量および含水率とマイクロクラックの形態変化との関係  
生材含水率が低い赤心材と生材含水率が高い黒心材を比較すると、マイクロクラックの形態変化に大差はないが、初期含水率の違いによりマイクロクラック発生に要する時間が黒心材では長いことが明らかになった。黒心材の生材と温水抽出材を比較すると、心材成分の除去により乾燥が早くなることがわかった。赤心材を減圧注入して黒心材と同程度の含水率にしても、マイクロクラックの形態変化に大差がないことから、心材成分量の大小は関与しない可能性が示唆された。黒心材の心材成分を除去しても辺材生材のマイクロクラック発生挙動とは異なることがわかった。すなわち、辺材では不可視なマイクロクラックが存在するのに対して、黒心抽出材では顕微鏡下で残留するマイクロクラックがほとんどであった。これら一連のマイクロクラック発生挙動について、経時的な動画としてビジュアル化した。

(5) マイクロクラックと早材変形との関係  
その場観察システムを使って、早材仮道管の変形挙動の可視化に成功した。マイクロクラックは晩材部の放射組織で発生し、放射組織に沿って伸長・拡大して最大になったあと収縮し始めるが、そのとき早材仮道管が変形し始めることが明らかになった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Effect of growing site on the fundamental wood properties of natural hybrid clones of Acacia in Vietnam. Nguyen Tu Kim, J. Matsumura, K. Oda. J of Wood Science 57(2), 87-93, 2011
- ② In situ visualization of microcracks by a confocal laser scanning microscopy system. H. Sakagami, J. Matsumura, K. Oda. Wood Material Science and Engineering 5, 110-115, 2010, 査読有
- ③ In-situ visualization of microcracks by CLSM system. H. Sakagami, J. Matsumura, K. Oda. 11th International IUFRO Wood Drying Conference "Recent Advances in the Field of Wood Drying". 370-375. 2010, 査読無
- ④ 乾燥に伴って発生するマイクロクラック

のその場観察. 阪上宏樹, 松村順司. 木材工業 64(9), 405-410, 2009, 査読有

- ⑤ In-situ visualization of hardwood microcracks occurring during drying. H. Sakagami, J. Matsumura, K. Oda. J of Wood Science 55(5), 323-328, 2009, 査読有
- ⑥ Microcracks occurring during drying visualized by confocal laser scanning microscopy. H. Sakagami, K. Tsuda, J. Matsumura, K. Oda. IAWA J 30(2), 179-187, 2009, 査読有
- ⑦ 環境を制御した CLSM 下における収縮挙動のその場観察. 阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 木材工業 63(6), 262-266, 2008, 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① スギ黒心材におけるマイクロクラックの発生挙動. 波多江芙美子, 阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 日本木材学会大会 (P15), 京都, 2011. 3
- ② 乾燥に伴う割れの経時変化と早材細胞の変形. 山本宏行, 阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 日本木材学会九州支部大会 (P9-10), 福岡, 2010. 8. 30-31
- ③ Visualization of Wood physical behaviors. Junji Matsumura, Chonbuk National University, Korea, 19 May 2010
- ④ スギ心材に発生するマイクロクラックの発生挙動. 阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 日本木材学会大会 (P15), 宮崎, 2010. 3
- ⑤ 乾燥過程におけるスギ辺材のマイクロクラック発生挙動と抵抗率との関係. 山本宏行, 阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 日本木材学会大会 (P15), 宮崎, 2010. 3
- ⑥ In-situ visualization of microcracks by CLSM. H. Sakagami, J. Matsumura, K. Oda. 11th International IUFRO Wood drying Conference. Skellefteå, Sweden. Jan 18-22, 2010
- ⑦ In-situ visualization of microcracks occurring during drying. H. Sakagami, J. Matsumura, K. Oda. 7th Pacific Regional Wood Anatomy Conference (P65). Kuala Lumpur, Malaysia. Aug 3-5, 2009
- ⑧ Visualization of microcracks occurring during drying. H. Sakagami, J. Matsumura, K. Oda. 9th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium (P.392), Rotorua, New Zealand. November 5-7 2008
- ⑨ 乾燥に伴って生じる広葉樹マイクロクラックの形態観察. 阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 日本木材学会九州支部大会

- (P17-18), 日田, 2008. 8. 22-23
- ⑩ 可視化技術を利用した広葉樹マイクロクラックの経時観察 II—アカシアハイブリッドを対象に—阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 日本木材加工技術協会大会 (P13-14), 旭川, 2007. 9
  - ⑪ 可視化技術を利用した広葉樹マイクロクラックの経時観察 I—センダンを対象に—. 阪上宏樹, 松村順司, 小田一幸. 日本木材学会大会 (P3), 広島, 2007. 8

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松村 順司 (MATSUMURA JUNJI)  
九州大学大学院農学研究院・准教授  
研究者番号：70243946

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし